

Akustische Tomographie im Bereich der Atmosphärischen Grenzschicht

A. Raabe, K. Arnold, A. Ziemann

Zusammenfassung:

Atmosphärenmodelle, die mit Hilfe numerischer Methoden nach einer Lösung der thermohydrodynamischen Gleichungen unter bestimmten Randbedingungen über einer vorgegebenen Unterlage (Landschaft) suchen, prognostizieren Volumenmittel entsprechender Größen. Zur Validierung der Modelle benötigte experimentell erfaßte meteorologische Größen repräsentieren meist Punktwerte.

Im folgenden werden theoretische Ansätze und eine experimentelle Meßmethode vorgestellt, die es ermöglichen, volumengemittelte Werte meteorologischer Größen bereitzustellen und somit zu numerischen Atmosphärenmodellen weitgehend konsistente Daten zu liefern.

Die Verfahren verwenden die horizontale Ausbreitung von Schallwellen in der Atmosphärischen Grenzschicht. Die Ableitung volumenbezogener Größen erfolgt über die Invertierung von Schallparameterwerten (akustische Tomographie).

Summary:

Atmospheric models, which searching by means of numerical methods after a solution of the thermodynamic equations under determined border conditions over a given underground (landscape), forecast volume averaged values of corresponding parameters. The experimental registered values for meteorological parameters used for the validation of models represent usually point values.

In following chapters theoretical estimations and an experimental measuring method are presented which volume averaged values of meteorological parameters provide and so rather firm data for numerical atmospheric models deliver.

The proceedings use horizontal spreading of acoustic waves in the Atmospheric Boundary Layer. Derivation of volume averaged parameters results from the invertation of acoustic parameter values (acoustic tomography).

1. Motivation zum Thema

Die Einführung mesoskaliger Atmosphärenmodelle in die tägliche Praxis der Wetterprognose (z.B. Deutschlandmodell des DWD) erzwingt deren Validierung durch experimentell bestimmte Daten hoher Genauigkeit und damit die Ableitung volumengemittelter meteorologischer Feldgrößen bei vorgegebener inhomogener Unterlage der Atmosphäre.

Schallwellen durchdringen die Luftschichten relativ ungehindert. Über die Aufzeichnung von Schallausbreitungsparametern kann auf meteorologische Größen geschlossen werden (bekannt: SODAR - Beyrich, Weill (1993); Klug (1991)).

Verfahren der akustischen Tomographie, übertragen auf das Gebiet der Atmosphärischen Grenzschicht, könnten volumengemittelte Größen bereitstellen und somit die Beweisnot der numerischen Modelle vermindern helfen.

Unter dem Begriff Tomographie wird die Erstellung eines Querschnitts eines Untersuchungsobjektes verstanden, wobei die Reaktion des betrachteten Objektes auf die Sondierungsenergie einer externen Quelle genutzt wird (Lo, Inderwiesen (1994)). Beim Verfahren der akustischen Tomographie wird dabei aus Laufzeitmessungen oder anderen Eigenschaften der akustischen

Wellenausbreitung auf den Zustand des durchquerten Mediums geschlossen. Damit eine räumliche Verteilung der Größen berechnet werden kann, sind z.B. Ausbreitungsgeschwindigkeiten in einem Meßgebiet auf verschiedenen Meßstrecken zu bestimmen, so daß jede Messung für sich genommen das Untersuchungsgebiet aus einem anderen Blickwinkel betrachtet. Erst die Invertierung der Einzelmessungen ergibt dann eine Aussage über eine räumliche Verteilung bestimmter Größen. Je größer die Zahl der Meßpunkte (Schallquellen und Empfänger), desto dichter durchziehen die einzelnen Meßstrecken das Meßgebiet und desto höher aufgelöst kann auch eine dreidimensionale Verteilung der die Messung beeinflussenden Größen berechnet werden. Vom physikalischen Grundansatz her bieten die tomographischen Verfahren somit die Möglichkeit der Erfassung von Raummittelwerten. Es bleibt jedoch die Frage der erreichbaren Genauigkeit zu klären.

Tomographie gehört als ein Invertierungsverfahren seit den 80er Jahren in Medizin, Biologie, Geologie und Geophysik zum Standard. Auch auf das Gebiet der Ozeanographie wurden akustische tomographische Verfahren erfolgreich übertragen (OTG(1982), DeFerrari et al. (1986)), obwohl man es hier mit einem fluiden Medium zu tun hat und eine Randbedingung, ein während der Meßzeit unveränderlicher Zustand des durchschallten Meßgebietes, nicht ohne weiteres angenommen werden darf.

Demgegenüber sind Versuche, akustische Tomographie im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht zu betreiben, bisher kaum unternommen worden. Einmal ist die Einhaltung der o.e. Randbedingung noch schwieriger zu realisieren, zum anderen führt die komplizierte mittlere Struktur der Atmosphäre (s. Tatarskij (1967)) dazu, daß sich Schallwellen nur unter günstigen Bedingungen über eine größere Strecke horizontal ausbreiten. Zudem müssen mehrere Schallsender und Empfänger bei relativ geringem Abstand zueinander in einem Gelände mit hoher Genauigkeit positioniert werden. Theoretische aber auch experimentelle Ansätze zur Lösung dieser Probleme gibt es allerdings (Nijs, Wapenaar (1987); Schmidetzki, Englich, Radek (1992); Wilson, Thomson (1994)).

2. Grundlagen der Schallausbreitung in der Atmosphäre

Laufzeiten von Schallsignalen auf definierten Strecken zwischen Sendern und Empfängern können u.a. als Ausgangswerte für akustische tomographische Verfahren dienen.

Die tomographischen Verfahren verteilen dann Schallgeschwindigkeiten auf verschiedene Bereiche der Strecken zwischen Sendern und Empfängern. Die in der Summe über die einzelnen Abschnitte berechneten Laufzeiten müssen gerade mit den beobachteten übereinstimmen. Eine Lösung dieses Problems läßt sich auf iterativem Wege erzeugen.

Dieses allgemeine Vorgehen läßt sich auf das Gebiet der Atmosphäre übertragen, da verschiedene meteorologische Größen die Ausbreitung von Schallwellen in der Atmosphäre beeinflussen. Einerseits geht den Schallwellen durch Reibungsprozesse zwischen den Luftmolekülen Energie verloren (hierbei spielt die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit eine Rolle), andererseits kann deren Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit durch Wind- und Temperaturfeld verändert werden (s. TBA (1984), Kneser (1961), VDI 2714).

Bei Betrachtung der Schallausbreitung als adiabatische Kompression erhält man folgenden Ausdruck für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit im unbewegten Medium (Laplacsche Schallgeschwindigkeit):

$$c = \sqrt{\kappa R_a T} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,4; \quad R_a = 287,05 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}; \quad T \text{ in K}; \quad c \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

Dieser Wert für die Schallgeschwindigkeit verändert sich nur geringfügig, wenn es sich um feuchte Luft handelt:

$$c = \sqrt{\kappa R_a T(1 + 0,513q)} \quad q \dots \text{spezifische Luftfeuchte in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}}; \quad c \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

Zu den räumlichen (x,y,z) und zeitlichen (t) Änderungen der Schallgeschwindigkeit durch entsprechende Veränderungen der Lufttemperatur kommt außerdem eine Beeinflussung durch das Windgeschwindigkeitsfeld $\vec{v}(t,x,y,z)$ hinzu:

$$\vec{c}(T, \vec{v}) = c(T(t, x, y, z)) + \vec{v}(t, x, y, z) \quad (3)$$

Dadurch ändern sich die Schallausbreitungsbedingungen und man beobachtet eine Abweichung der Schallstrahlen vom geradlinigen Verlauf (s. TBA (1984)).

An der Grenze zwischen zwei Gebieten der Atmosphäre, die sich in Lufttemperatur bzw. Windgeschwindigkeit unterscheiden, werden Schallstrahlen gebrochen. Die auf eine Fläche unter dem Winkel α_1 auftreffende ebene Welle (aus Medium 1) setzt ihren Weg unter dem Winkel α_2 im Medium 2 (mit veränderter Temperatur oder Geschwindigkeit) folgendermaßen fort (Die Winkel sind dabei auf die Wellennormale bezogen.):

$$\sin \alpha_2 = \frac{k_1 \sin \alpha_1}{k_2 + (k_2 Ma_1 - k_1 Ma_2) \sin \alpha_1} \quad (4)$$

$k_1, k_2 \dots$ Wellenzahlen im Medium 1 bzw. 2

mit

$$Ma_1 = \frac{v_1}{c_2}, \quad Ma_2 = \frac{v_2}{c_1}$$

Die vorgestellten Gesetzmäßigkeiten werden auch bei der Modellierung von Schallstrahlen und ihrer Ausbreitung durch die Atmosphäre angewendet.

3. Modellierung der Schallausbreitung in der Atmosphärischen Grenzschicht

Zielstellung bei dieser theoretischen Studie ist die Kopplung von Atmosphärenmodellen mit sogenannten ray-tracing-Modellen zur Untersuchung der Schallausbreitung unter den Bedingungen einer turbulenten Atmosphärischen Grenzschicht im Hinblick auf die Ableitung von Schallausbreitungsparametern, aus denen über Invertierungsverfahren auf meteorologische Größen geschlossen werden soll.

Die Ausbreitung des Schalls kann mit Schallstrahlen beschrieben werden, wenn die Modellvorstellungen der geometrischen Akustik anwendbar sind (kleine Wellenlängen im Vergleich zu den Ausmaßen des Untersuchungsobjektes). Schallstrahlen stellen dann Linien dar, deren Tangenten mit der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle übereinstimmen. Obwohl die Anwendung der Schallstrahlentheorie mit Einschränkungen verbunden ist, bietet sie gegenüber aufwendigen Wellenmodellen u.a. folgende Vorteile: leichte Visualisierung der Schallausbreitung in der Atmosphäre und einfache Berücksichtigung von Inhomogenitäten im Medium durch Anwendung des Brechungsgesetzes.

In der Literatur werden einige Beispiele für ray-tracing-Modelle in der Atmosphärischen Grenzschicht vorgestellt. Bei Verwendung linearer vertikaler Profile für die Schallgeschwindigkeit im unbewegten Medium können Schallstrahlen als Kreisbögen beschrieben werden, deren Radien abhängig von der vertikalen Temperaturverteilung sind (Franck und Sager (1974)). Ein semianalytisches Schallstrahlenmodell mit logarithmischen Schallgeschwindigkeitsprofilen wird von Salomons (1994) angewendet. Schallstrahlenberechnung durch numerische Integration der Schallstrahlen-Differentialgleichungen führen bei Boone et al. (1991) und Hallberg et al. (1988) für bewegte, inhomogene Medien zur Darstellung der Schallausbreitung.

Das Schallwegintegral erhält man unter Verwendung von (4) und

$$\tan \alpha_2 = \frac{\sin \alpha_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2}} = \frac{dx}{dz} \quad (5)$$

für geringmächtige Schichten der Atmosphäre, in denen die Schallgeschwindigkeit gleich bleibt, in folgender Form:

$$x_{\text{ray}} = \sin \alpha_1 \int_{z_1}^{z_2} \frac{c_2 dz}{\sqrt{c_1^2 - c_2^2 \sin^2 \alpha_1}} \quad (6)$$

α_1 ...Emissions – oder Einfallswinkel, α_2 ...Ausfallwinkel

$c_1 = c(z_1)$, $c_2 = c(z_2)$

Zusätzlich zur Anpassung eines vorhandenen Strahlenverfolgungsmodells (Raabe (1995)) an atmosphärische Bedingungen bei stabiler Schichtung und der somit vorhandenen Möglichkeit der Totalreflexion von Schallstrahlen wird zur Zeit an einem zweidimensionalen ray-tracing-Modell für eine homogene Atmosphäre in x-Richtung gearbeitet. Für die Bereitstellung von Profilen der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit wird dabei ein eindimensionales Grenzschichtmodell, das an der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelt wurde (Ziemann (1996)), verwendet. Ein Beispiel für diese Schallausbreitungsmodellierung ist in Abbildung 1 dargestellt.

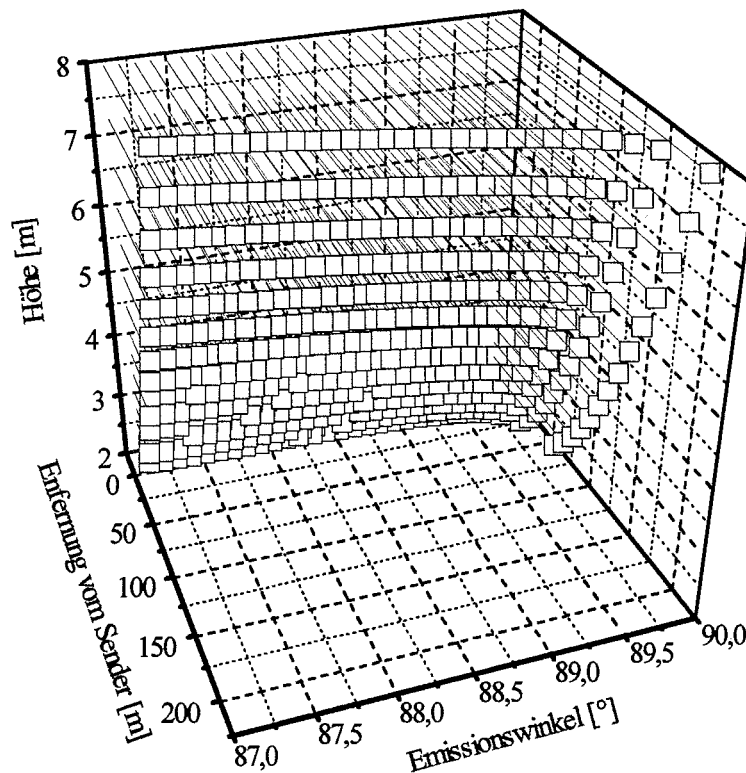


Abb. 1: Schallstrahlenverläufe für verschiedene Emissionswinkel (Erklärung siehe Text).

Bei dieser Simulation wurde das aus dem Grenzschichtmodell gewonnene Temperaturprofil vom 20.09. um 12 Uhr verwendet und keine Beeinflussung der Schallstrahlen durch Wind angenommen. Als Abstrahlwinkel von der Schallquelle (in 2 m Höhe) wurde ein Bereich von

87,1° bis 89,9° (Winkel gegen das Einfallslot des Schallstrahls) gewählt. Ein Schallstrahl (kleine Quadrate in der Abbildung) kann entlang eines Wertes für den Emissionswinkels in der horizontalen (Entfernung vom Sender) bzw. vertikalen (Höhe) Ausbreitung verfolgt werden. Für nahezu Horizontalabstrahlung (89,9°) erreichen die Schallstrahlen ihre vergleichsweise größte horizontale Reichweite von ca. 200 m. Da um diese Tageszeit eine labile Schichtung im bodennahen Bereich vorherrscht, werden die Schallstrahlen von der Erde weg gebrochen, und es entsteht eine Schall-Schattenzone am Boden. Die Abweichungen des aktuell berechneten Schallaufweges bzw. der aktuellen Schalllaufzeit von der geometrischen Schallausbreitung (ohne Atmosphäreneinfluß) liegen maximal bei 0,20 m bzw. 0,003 s für eine Sender-Empfänger-Entfernung von 200 m.

Mit Windeinfluß wird das Aussehen der erhaltenen Schallstrahlen entsprechend der vorherrschenden Windrichtung und -geschwindigkeit modifiziert.

Für die meßtechnische Umsetzung der Problemstellung ist die zu erreichende Genauigkeit von großem Interesse. Um z.B. die Lufttemperaturbestimmung mit Hilfe des verwendeten akustischen remote-sensing-Verfahrens auf 0,2 K genau durchzuführen, müssen Laufzeiten mit einer Auflösung im Bereich von ca. 0,1 ms in Abhängigkeit von der Sender-Empfänger-Entfernung gemessen werden (s. Abb. 2).

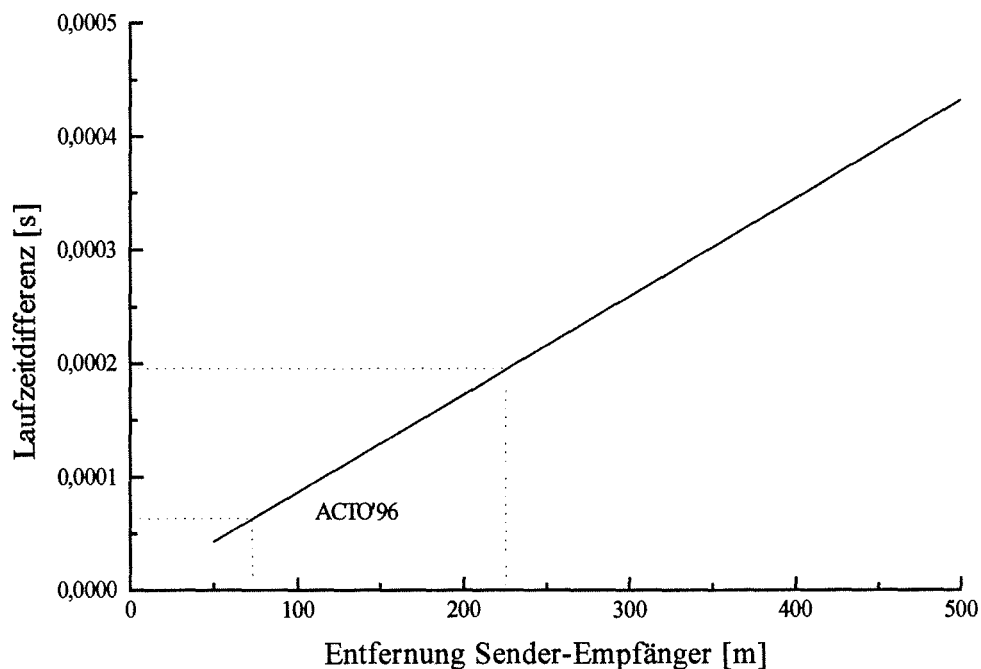


Abb. 2: Laufzeitunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger für eine Schallgeschwindigkeitsdifferenz von 0,1 m/s.

4. Erste experimentelle Ergebnisse

4.1 Zielsetzung

Es sollen im Rahmen der Meßkampagne ACTO'96 (ACoustic TOMography) erste Experimente zur Schallausbreitung in der Atmosphärischen Grenzschicht durchgeführt werden. Dazu wird von mehreren Positionen gleichzeitig ein Schallsignal ausgesendet, daß von mehreren Empfängern registriert wird. Um den Zustand der Atmosphäre beschreiben zu können, werden gleichzeitig meteorologische Größen gemessen.

4.2 Aufbau des Meßfeldes

Die Wahl des Gebietes zur Durchführung der akustischen Experimente erfolgte nach verschiedenen Kriterien. Wichtig ist, daß in der Nähe des Meßfeldes keine störenden Umgebungsgereusche auftreten und die Schallausbreitung nicht durch Hindernisse beeinflusst wird. Ein wesentliches Kriterium war außerdem, daß sich das Meßfeld in nicht zu großer Entfernung vom Institut befindet und hinreichend gesichert ist.

Einen Kompromiß in dieser Hinsicht stellt das Gelände der Rennbahn Scheibenhof in der Stadt Leipzig dar. Die Rennbahn befindet sich in zentraler Lage, umgeben von einer größeren Parkanlage. Die Ausdehnung beträgt in Nord-Süd-Richtung ca. 650 m, in West-Ost-Richtung ca. 500 m. Innerhalb der Bahnen ist der Boden vollständig mit Gras bedeckt (Pflanzenhöhe ca. 5 cm), nur am Rand stehen einzelne Bäume oder Gebüsch. Auf dieser Wiese wurden auf einem Feld der Größe von 200 m × 200 m vom Vermessungsamt der Stadt Leipzig 10 Punkte ausgemessen und markiert. Auf diesen Punkten kann wahlweise ein Schallsender oder -empfänger positioniert werden. Die Position der ausgemessenen Punkte wurde mit einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ m bestimmt. Jedoch kann aufgrund der Geometrie und Konstruktion der Mikrofone und Druckkammerlautsprecher die Schallweglänge nur mit einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-2}$ m festgelegt werden.

Für den Zeitraum der Meßkampagne im Herbst 1996 wurde eine Verteilung der Sender und Empfänger entsprechend Abbildung 3 gewählt.

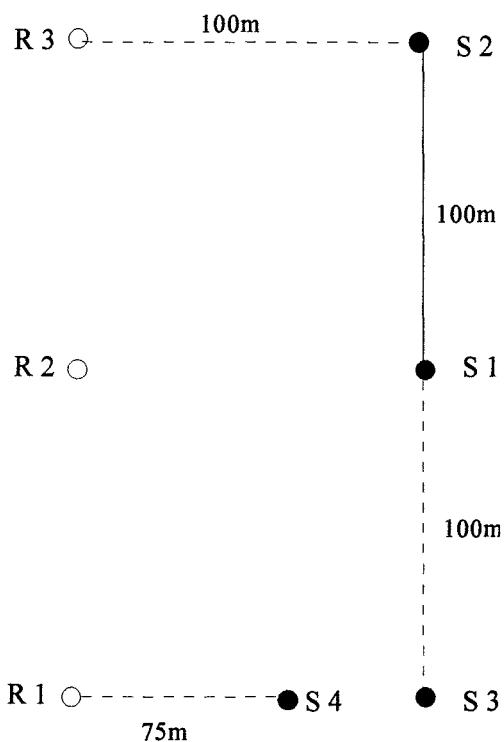


Abb. 3: Lage der Meßpunkte zueinander, die Sender wurden mit S1 bis S4 bezeichnet, die Empfänger mit R1 bis R3.

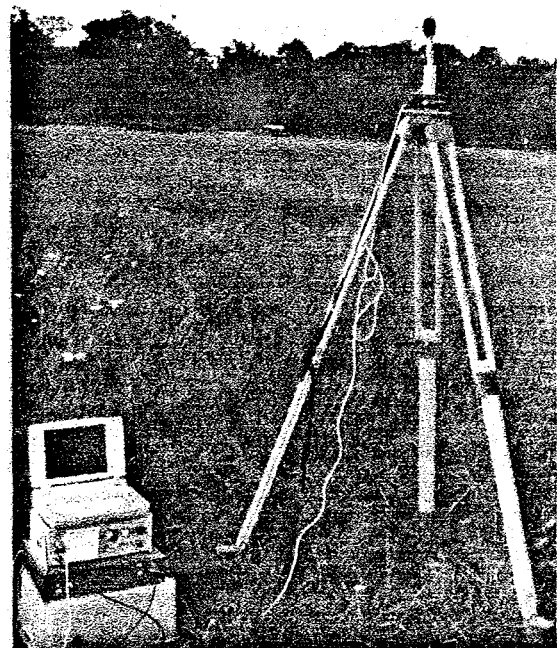


Abb. 4: Empfangseinheit, bestehend aus Mikrofon, Datenlogger, Schallpegelmesser und Laptop.

4.3 Parameter des akustischen Meßsystems

Während dieses Experimentes wurden 4 Sender und 3 Empfänger, jeweils in einer Höhe von 2m über dem Boden, eingesetzt. Als Sender werden Druckkammerlautsprecher mit einer Leistung von 40 W verwendet. Die Lautsprecher werden mit einem Hifi-Verstärker betrieben. Über ein zentrales Steuerteil werden alle einzelnen Lautsprecher gleichzeitig mit einer Frequenz von 500 Hz angeregt. Die Dauer und Anzahl der Schwingungsanregung kann am Steuerteil eingestellt werden. Während der Meßkampagne wurde mit einer Signaldauer von 4 ms bzw. von einer Sekunde gearbeitet. Diese Signale werden im Abstand von 10 s jeweils fünf mal gesendet. Nach einer Pause von 10 min startet das Programm erneut.

Aufgezeichnet werden die Signale von 3 Empfangsstationen (siehe Abb. 4), die vom Steuerteil über eine Synchronisationsleitung gleichzeitig initialisiert werden. Die Empfänger sind jeweils mit einem 1-Zoll-Meßmikrofon bestückt. Das Signal gelangt über einen Schallpegelmesser, der zur Verstärkung und Filterung des Signals dient, zum Datenlogger. Dort wird das analoge Signal mit einer Abtastrate von 10 kHz digitalisiert und zwischengespeichert.

Die Aufzeichnungslänge wird vor der Messung festgelegt und variiert entsprechend des Abstandes zwischen Sender und Empfänger zwischen 500 und 700 ms.

Der Datenlogger kann wahlweise in einem Automatikmodus oder manuell betrieben werden. Im Automatikmodus werden die empfangenen Daten auf einer Memorycard gespeichert und können nach der Messung ausgelesen werden. Wird der Datenlogger manuell genutzt, werden die empfangenen Signale auf einem Laptop graphisch dargestellt und gespeichert.

4.4 Experimentelle Bestimmung der meteorologischen Parameter

Für die Simulation der Schallausbreitung in der Atmosphäre ist es notwendig, gleichzeitig zu den akustischen Messungen meteorologische Parameter zu erfassen.

Von Bedeutung für die Berechnung der Schallausbreitung ist die Kenntnis der aktuellen Schichtungsverhältnisse in der atmosphärischen Grenzschicht. Um die vertikale Verteilung von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit zu bestimmen, wurde ein Meßmast errichtet (Schienbein und Arnold (1996)). Dieser 12 m hohe Mast erlaubt eine Untersuchung des vertikalen Profils der Temperatur und Windgeschwindigkeit.

Zur Validierung der Schallausbreitungsmodelle werden außerdem Informationen über die horizontale Verteilung der Temperatur und Windgeschwindigkeit benötigt. Um Angaben über die interessierenden meteorologischen Parameter bereitzustellen, wurde innerhalb des Meßgebietes zusätzlich ein Ultraschallanemometer aufgebaut. So können mit einer hohen zeitlichen Auflösung, die zwischen einer und 60 Sekunden variiert, die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie deren Fluktuationen erfaßt werden.

4.5 Analyse der akustischen Registrierungen

Zwei physikalische Größen dienen als Ausgangswerte für akustische tomographische Verfahren. Einmal sind das Laufzeiten von Schallsignalen auf definierten Strecken zwischen Sendern und in verschiedenen Entfernungen angeordneten Empfängern; zum anderen sind das die Registrierungen von Schallpegeländerungen an den Empfängern, wenn von einer konstanten Sendeleistung ausgegangen wird. Hier wurde die Aufmerksamkeit zunächst auf die Messung von Laufzeiten des Schallsignales gerichtet. An jeder Empfangsstation werden die auftreffenden Schallwellen der 4 Sender registriert. Für eine Ermittlung der Laufzeit zwischen Sender und Empfänger wird zunächst der Einsatzpunkt der Schallwelle graphisch bestimmt. Die Abtastung des Datenloggers mit einer Frequenz von 10 kHz ermöglicht eine zeitliche Auflösung der Schalllaufzeit mit 0,1 ms.

In Abbildung 5 ist die Amplitude des Schalldruckes in Abhängigkeit von der Ausbreitungszeit für Schallimpulse von unterschiedlicher Andauer dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die

Einsätze bzw. Überlagerungen der einzelnen Schalldruckwellen. Die Zuordnung der Sender zu den Einsatzpunkten erfolgt aus der Geometrie des Meßfeldes. Unklarheiten bei der Zuordnung sind aufgrund der großen Laufzeitunterschiede nahezu ausgeschlossen.

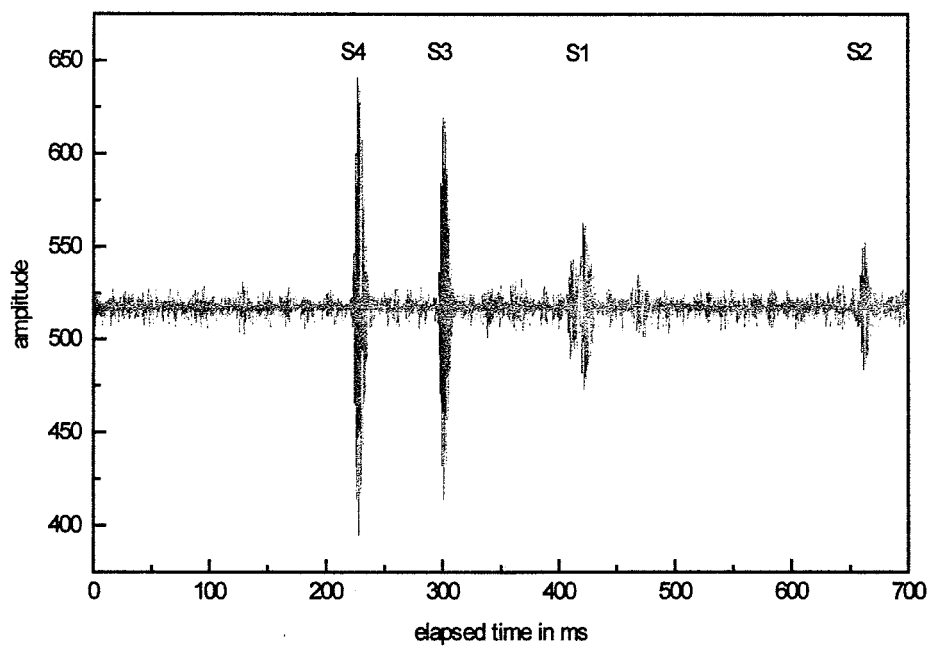
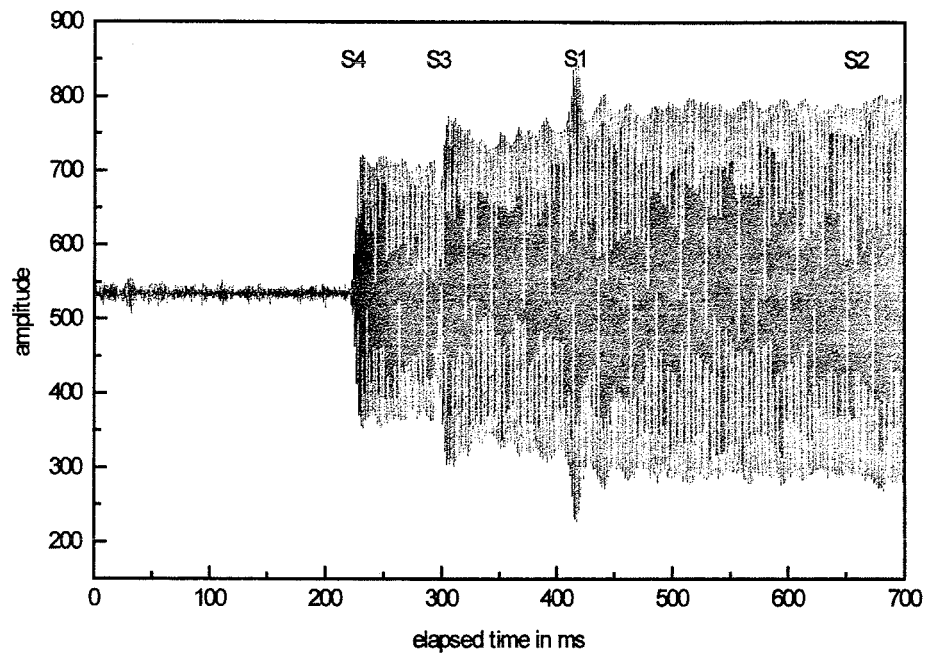


Abb. 5: Laufzeitdiagramme des Datenloggers R1 für verschiedene Schwingungsanregungen, obere Abbildung: Messung am 27.09.1996 um 15.42 Uhr Signaldauer 1 s, untere Abbildung: Messung am 07.10.1996 um 18.36 Uhr Signaldauer 4 ms.

Im oberen Diagramm wurde ein Signal eine Sekunde von 4 Sendern gleichzeitig abgestrahlt. Die Einsatzpunkte der ersten drei Druckwellen (S4, S3, S1) am Empfänger R1 sind deutlich durch eine Überlagerung der Amplituden zu erkennen. Lediglich der Einsatz des Signals des Senders S2 aus einer Entfernung von 223,5 m ist nicht mehr eindeutig zuzuordnen. Eine Verkürzung der Dauer des ausgesendeten Signals auf 4 ms, wie im unteren Diagramm der Abb. 5 dargestellt, bewirkt eine deutliche Trennung der einzelnen Signaleinsätze. Bei einer Signaldauer, die deutlich kürzer als die Laufzeitdifferenzen zwischen den einzelnen Sendern ist, kann der Einsatz jeder einzelnen Schalldruckwelle registriert werden. Das aufgezeichnete Signal weist eine deutlich höhere Anzahl von Schwingungen als das ausgesendete Signal auf. Ursache dafür ist das Nachschwingen des Druckkammerlautsprechers. Sind die Einsatzpunkte, wie im unteren Diagramm der Abb. 5 deutlich getrennt, so ist allein durch eine graphische Analyse eine Ermittlung der Laufzeit zwischen den Sendern und Empfängern mit einer Genauigkeit unter 0,5 ms möglich.

4.6 Laufzeittomographie

Mit Hilfe eines zweidimensionalen Tomographieprogrammes (Danckwardt (1995)) wurden erste Untersuchungen der experimentell bestimmten Laufzeiten für die Schallausbreitung vorgenommen. Beachtenswert sind dabei die Schallgeschwindigkeitsänderungen hervorgerufen durch veränderte atmosphärische Umgebungsbedingungen innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne. Die auf Abbildung 6 dargestellten Schallgeschwindigkeiten sollen nach einer Fehleranalyse zur Lufttemperaturbestimmung auf dem Meßfeld dienen. Die so erhaltenen Flächenmittel liefern direkt konsistente Werte für meso- bzw. mikroskalige Atmosphärenmodelle.

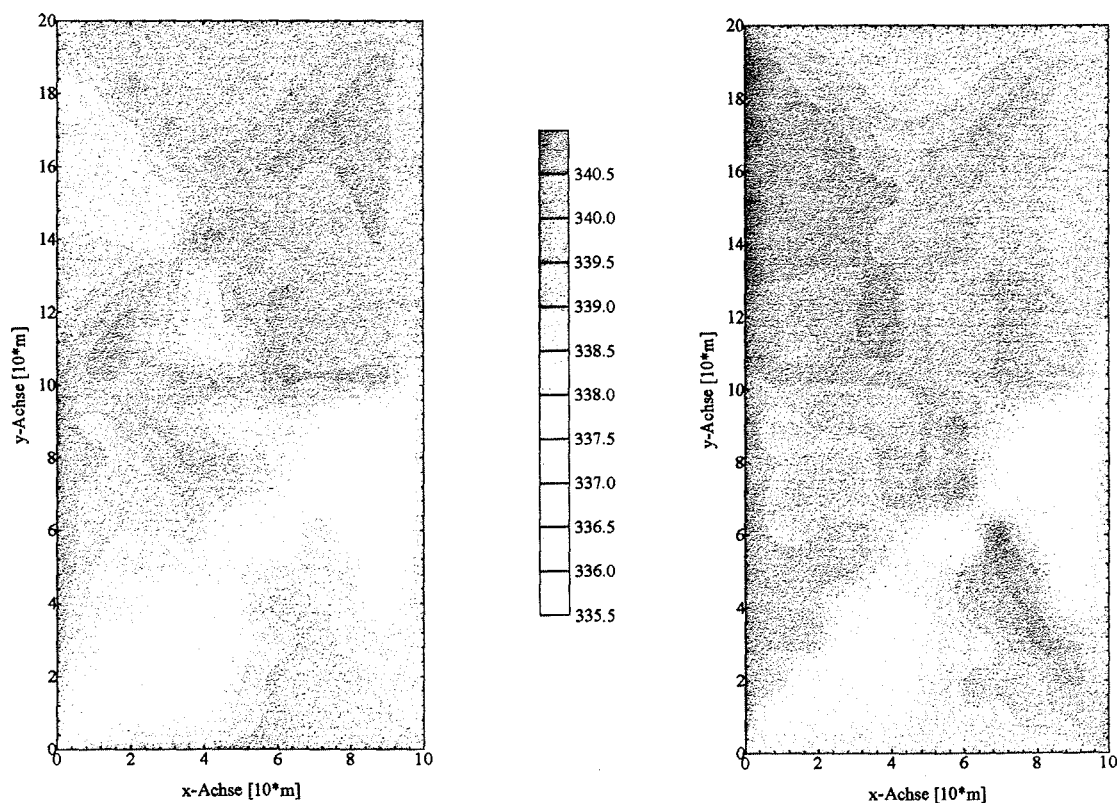


Abb. 6: Schallgeschwindigkeit [ms^{-1}], Messungen am 27.09.1996 um 15.42 Uhr (links) und um 16.02 Uhr (rechts), Entfernungen auf der x- und y-Achse [$10^1 \cdot \text{m}$].

5. Schlußfolgerungen

Die ersten Auswertungen zur Meßkampagne ACTO'96 zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit des vorgestellten Meßverfahrens für eine akustische Tomographie der Atmosphärischen Grenzschicht. Die theoretisch geforderte Meßgenauigkeit wird erreicht, eine weitere Erhöhung der Sender- und Empfängeranzahl könnte jedoch zu einer größeren Überdeckung und Auflösung des Meßfeldes beitragen und damit auch die Sicherheit der Laufzeittomographie sowie daran anschließender Temperatur- bzw. Windbestimmung erhöhen.

Zur Simulation und Bestimmung volumengemittelter Werte für meteorologische Größen müssen außerdem die vorhandenen Schallstrahlenmodelle sowie das Tomographieprogramm zu einer dritten Dimension (vertikal) erweitert werden.

Danksagung:

Ganz besonders möchten wir uns für die Unterstützung durch Herrn Dr. Schienbein, Herrn Weise und Herrn Engelhorn und die Studentinnen Simone Gräßer und Katja Friedrich bedanken. Nur mit Ihrer aufopferungsvollen Unterstützung war die Vorbereitung und Durchführung der Meßkampagne möglich.

Außerdem möchten wir uns für die Durchführung der Vermessungsarbeiten und den Verleih von Stativen bei dem Vermessungsamt der Stadt Leipzig an dieser Stelle bedanken.

Ebenso möchten wir uns beim Leipziger Rennklub e.V. bedanken, der uns vor und während der Meßkampagne das Gelände der Rennbahn Scheibholz für unsere Experimente zur Verfügung stellte.

Unser Dank gilt auch der Hauptfeuerwehrwache der Stadt Leipzig, die durch die Bereitstellung einer Drehleiter, die Montage der Meßinstrumente bis in Höhen von 12 m ermöglichte.

Literatur:

Boone, M.M., E.A.Vermaas: 1991, A new ray-tracing algorithm for arbitrary inhomogeneous and moving media, including caustics. *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 2109-2117.

Beyrich, F., A.Weill: 1993, Some Aspects of determining the stable boundary layer depth from sodar data, *Bound. Lay. Meteorol.* **63**, 97-116.

Danckwart, E.: 1995, Akustische Tomographie-Invertierungsalgorithmus. Institut für Geophysik der Universität Leipzig, private Mitteilungen.

DeFerrari, H.A., D.S.Kondo; L.L.Monjo: 1986, Shallow water Tomography. In: *Ocean. Seism. Acoust.* (ed. T.Akal, J.M.Berkson) Pl.Press, 269-279.

Franck, H., G.Sager: 1974, Zur Schallwegverteilung in der unteren Grundsicht bei Vorhandensein einer Bodeninversion. *Z. Meteorol.* **24**, 130-137.

Hallberg, B., C. Larsson, S. Israelsson: 1988, Numerical ray tracing in the atmospheric surface layer. *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 2059-2068.

Klug, H.: 1991, Sound-speed profiles determined from outdoor sound propagation measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 475-481.

Kneser, H.O.: 1991, Handbuch der Physik Akustik Bd. 11/1 Spr.Vlg. S. 192-195.

Lo, Tien-when, P.L. Inderwiesen: 1994, Fundamentals of seismic tomography. Geophysical Monograph Series 6, Society of Exploration Geophysicists, 178 S.

Nijs, L., C.P.A. Wapenaar: 1990, The influence of wind and temperatur gradients on sound propagation, calculated with the two-way wave equation, J. Acoust. Soc. Am. **87**,187-199.

OTG - Ocean Tomography Group: 1982, A demonstration of Ocean Acoustic Tomography, Nature **299**, 121-125.

Raabe, A.: 1995, Beitrag zur Kontrolle des Wasseraustausches zwischen Ostsee und Nordsee mit Hilfe akustischer Methoden, Forschungsbericht zum durch die DFG geförderten Projekt Ra 569/1-1, 42 S.

Salomons, E.M.: 1994, Diffraction by a screen in downwind sound propagation: A parabolic-equation approach. J. Acoust. Soc. Am. **95**, 3109.

Schienbein, S., K.Arnold: 1996, Konzeption und Aufbau einer Meßeinrichtung für die Erfassung von Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten bis 12 m Höhe, Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig, Heft 4.

Schmidetzki, R., D.Englich, U.Radek: 1991, Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung über große Entfernungen , in: Fortschritte der Akustik, DAGA-91.

TBA: 1984, Taschenbuch Akustik, Teil I. Vlg. Technik Berlin, 848 S.

Tatarskij, V.I.: 1967, Rasprostranenie voln v turbulentnoj atmosfere, Isdat Nauka Moskva 487 S.

Wilson, D.K., D.W.Thomson: 1994, Acoustic tomographic monitoring of the atmospheric surface layer, J. Atm. Ocean. Technol. **11**, 751-768.

Ziemann, A.: 1996, Numerical simulation of meteorological parameters in and above forest canopies, Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig, Heft 4.

Anschrift der Autoren:

Dr. Armin Raabe
Dipl.-Met. Klaus Arnold
Dipl.-Met. Astrid Ziemann
Universität Leipzig
LIM-Institut für Meteorologie
Stephanstr. 3
04103 Leipzig